

ния рудоугольных окатышей и соответствуют данным, имеющимся в литературе. Разработанная модель может быть использована для оптимизации технологических параметров процесса и свойств шихтовых материалов.

Список использованных источников

1. I. Kobayachi, Y. Tanigaki, A. Uragami. Engineering Company, Kobe Steel, Ltd, Osaka, Japan // Iron and Steelmaker. 2001. Vol.28, №9. Pp. 19–22.
2. Shoichi Kikuchi, Shuzo Ito, Dr. Isao Kobayashi, Osamu Tsuge, Koji Tocuda. «ITmk3 Process», Kobelco technology review. 2010. №29 Dec. P. 77.
3. Дубровский Б. А., Шиляев П. В., Редин Е. В. и др. Металлизация шпатовых железняков Бакальского месторождения с получением гранулированного чугуна // Сборник трудов VI международной конференции «Энергосберегающие технологии в промышленности, печные агрегаты, экология». М.: МИСиС, 2012. С. 178–182.

УДК 669.013

Б. А. Боковиков, А. А. Солодухин

ООО «Научно–производственное внедренческое предприятие ТОРЭКС»,
г. Екатеринбург, Россия

К ВЫБОРУ СПОСОБА УМЕНЬШЕНИЯ ПЕРЕУВЛАЖНЕНИЯ ОКАТЫШЕЙ В ЗОНЕ СУШКИ ОБЖИГОВОЙ КОНВЕЙЕРНОЙ МАШИНЫ

Аннотация

Рассмотрен способ уменьшения переувлажнения слоя сырых окатышей на обжиговой машине с помощью камеры предварительного подогрева (КПП). На основании результатов расчетов на математической модели показана эффективность работы КПП при различных условиях и определены оптимальные параметры ее работы.

Ключевые слова: переувлажнение, сушка, камера предварительного подогрева.

Abstract

The method of overwatering reduction for green pellets bed have been considered on the IM by means of preheating chamber. An efficiency of preheating chamber operation is ensured on the basis of estimation results using the math model. And as a result, preheating chamber was tested in various conditions with determination of its optimal operation parameters.

Keywords: overwatering, drying, preheating chamber.

Сушка окатышей занимает до 30 % площади обжиговых конвейерных машин, что является основным сдерживающим фактором повышения их производительности. В связи с этим естественно стремление интенсифицировать процесс сушки за счет повышения температуры

теплоносителя. Однако высокая температура теплоносителя, подаваемого в слой, приводит к большему насыщению его влагой и усилению образования конденсата, т. е. к увеличению переувлажнения окатышей. Явление переувлажнения окатышей в слое не поддается исследованию экспериментальным путем и только с применением математической модели, опубликованной ранее [1], удастся выявить закономерности этого сложного слоевого процесса. Общая картина переувлажнения окатышей в слое в первой секции зоны сушки с продувом теплоносителя длиной 10 м показана на рис. 1. Здесь видно, что на верхних горизонтах слоя на длине от 4 до 8 метров (в течение 1,4 мин) наблюдается некое предельное переувлажнение окатышей, равное в данном случае $\Delta b_{\text{пред}} = 0,56\%$ и соответствующее условию насыщения окатышей влагой.

$\Delta b, \%$

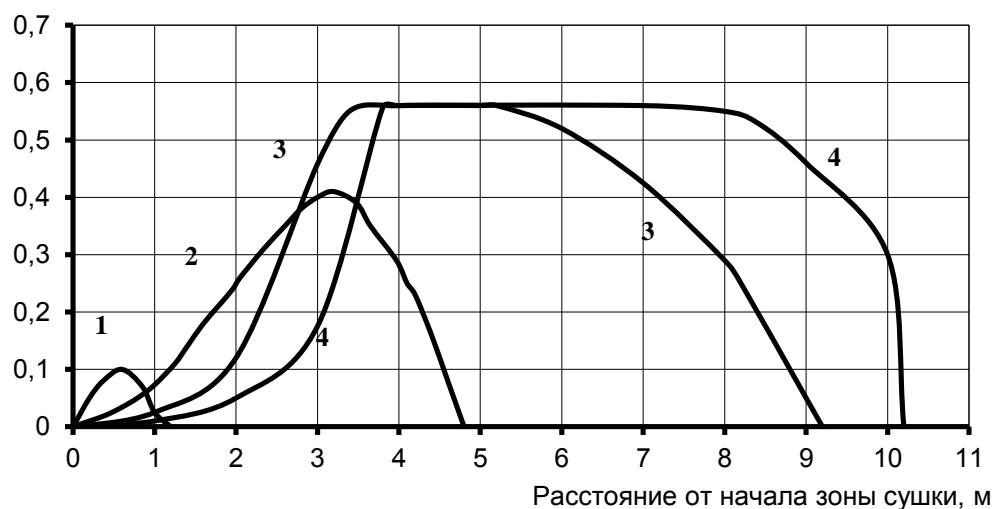


Рис. 1. Величина переувлажнения окатышей ($\Delta b, \%$) на различных горизонтах слоя по длине машины в зоне сушки с продувом теплоносителя (цифры у кривых горизонты, мм от колосников: 1 – 85; 2 – 200; 3 – 320; 4 – 435)

На этих горизонтах при конденсации водяного пара образуется свободная (капельная или пленочная) влага, которая в конечном счете выносится на поверхность слоя и образует так называемый «дождь», часто фиксируемый визуально на многих обжиговых машинах. Заметим, что часть капель свободной влаги уносится потоком газа через колпак первой зоны сушки и не требует тепла в слое на их испарение. Но этот факт нельзя считать полезным для работы зоны сушки, так как наличие свободной влаги в газе на выходе из слоя свидетельствует об интенсивной конденсации пара в объеме слоя. А это, как показали расчетные исследования, является главным фактором, ограничивающим высоту слоя сырых окатышей, поскольку увеличение высоты приводит к резкому росту количества конденсата, выносимого из слоя. Подбором параметров теплоносителя для зоны сушки продувом длиной не более 6 м возможно снизить интенсивность конденсации, но в ограниченных пределах. Это можно показать на следующем примере. Расчеты выполнены при высоте слоя сырых окатышей 400 мм при начальной их температуре 20 °С. Основные результаты этих расчетов приведены на рис. 2 в виде зависимости характеристик переувлажнения от удельного расхода тепла в зоне сушки 1. На этих графиках видно, что при малой тепловой нагрузке этой зоны велико переувлажнение в следующей зоне с прососом теплоносителя (много свободной влаги выносится

на границу слой/постель). При очень большой тепловой нагрузке зоны сушки 1, наоборот, именно в этой зоне развивается переувлажнение с выносом свободной влаги на поверхность слоя. Но имеется оптимальная область по тепловой нагрузке в зоне сушки 1 – от 35 до 55 кДж/кг, где предельного переувлажнения нет и отсутствует вынос свободной влаги из слоя в обеих зонах. Эта оптимальная зона настолько узка, что на практике обеспечить ее поддержание может оказаться затруднительным. Расчеты показали, что при высоте слоя сырых окатышей более 400 мм обычная тепловая схема зоны сушки с одним реверсом теплоносителя уже не позволяет достичь полного предотвращения выноса свободной влаги из слоя, как это было представлено на рис. 2.

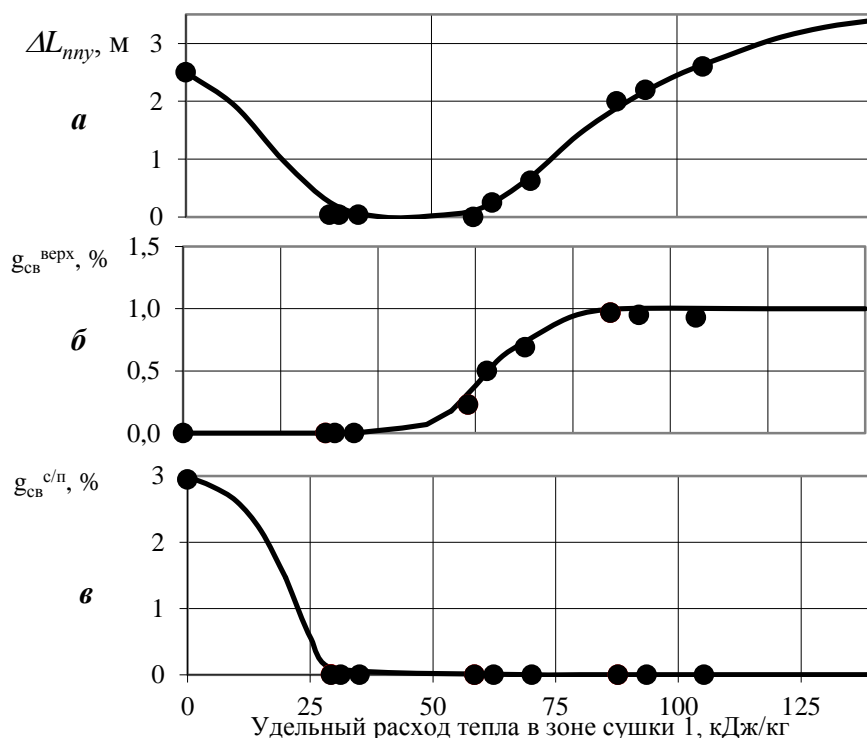


Рис. 2. Влияние соотношения параметров зон сушки обжиговой машины ОК-520 на показатели переувлажнения: а) длина области существования предельного переувлажнения; б) количество свободной влаги в верхней части слоя; в) количество свободной влаги на границе слой/постель

Из практики известно, что повышенная температура сырых окатышей существенно уменьшает переувлажнение слоя за счет снижения интенсивности конденсации. Значимое изменение температуры шихты перед окомкованием может быть обусловлено сезонными колебаниями температуры (от $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ зимой до $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ летом), а также особенностями технологии как при сухом способе подготовки шихты (нагрев при помоле в мельницах), так и при обработке шихты водяным паром. Каких-либо систематизированных данных по этому вопросу не имеется, поэтому провели моделирование процессов сушки и конденсации влаги при начальной температуре сырых окатышей от 10 до $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (продув на длине 12 м слоя высотой 400 мм теплоносителем с температурой $240\text{ }^{\circ}\text{C}$ и скоростью фильтрации $1,15\text{ м/с}$). Результаты расчетов показали, что эффективность сушки окатышей в зоне с продувом теплоносителя слабо зависит от начальной температуры окатышей, но область переувлажнения

при повышении начальной температуры существенно сокращается – F_{Σ} уменьшается в несколько раз (рис. 3). Здесь F_{Σ} имеет размерность $\% \cdot \text{м} \cdot \text{мин}$, т. е. это произведение Δb (абс. %) на текущую высоту переувлажненного слоя (м), проинтегрированное по времени на всей длине зоны переувлажнения окатышей.

При этом интенсивность конденсации водяных паров на окатышах резко падает и вынос свободной влаги на поверхность слоя при 40 °С полностью прекращается. В диапазоне сезонных колебаний температуры сырых окатышей от 10 до 20 °С вынос конденсата на поверхность слоя, определяющий интенсивность «дождя» над слоем, может изменяться практически в два раза (см. рис. 3).

Таким образом, повышение начальной температуры сырых окатышей перед зоной сушки является мощным фактором для снижения переувлажнения слоя и при 35–40 °С конденсация в слое может быть практически полностью предотвращена (подавлена).

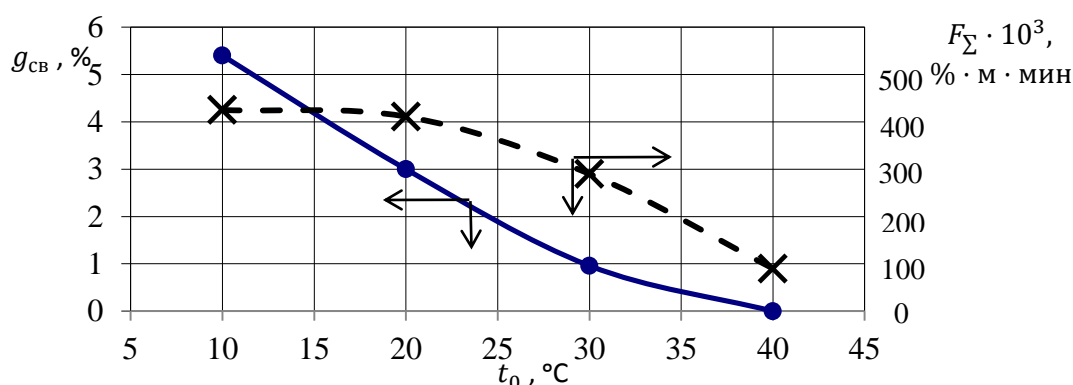


Рис. 3. Зависимость характеристик переувлажнения слоя от начальной температуры окатышей t_0 (количество свободной влаги в слое $g_{\text{св}}, \%$; интегральный показатель переувлажнения слоя F_{Σ})

При отсутствии нагрева шихты или сырых окатышей вне обжиговой машины остается только искать способ нагрева окатышей в начале зоны сушки. Такой способ впервые был предложен Я. Л. Белоцерковским в виде камеры предварительного подогрева с прососом горячего теплоносителя перед зоной сушки [2]. Этот способ был осуществлен на ОКМ–536 Костомушского ГОКа, но конструктивно недостаточно удачно и эксплуатировался короткое время. Как показал наш анализ с помощью математической модели, параметры этого устройства были выбраны неудачно и поэтому не обеспечили эффективной его работы [3]. Однако наблюдения за этим устройством показали, что ввод его в работу привел к исчезновению так называемого «дождя» над поверхностью слоя окатышей. В работе [4] рассмотрен частный случай устройства камеры предварительного подогрева сырых окатышей на ОКМ–520 Михайловского ГОКа с использованием «нулевой» (аспирационной) вакуум-камеры размером 2×4 м. Расчеты показали, что подбором рациональных параметров такой камеры возможно достичь повышения температуры сырых окатышей в пределах до 25–30 °С. При этом будет обеспечено уменьшение объема области переувлажнения в зоне сушки с продувом теплоносителя почти вдвое и практически полное отсутствие выноса свободной влаги из слоя. Это может позволить увеличить высоту слоя окатышей на машине и улучшить технико-экономические показатели ее работы.

Далее проанализируем основные закономерности работы камеры предварительного подогрева (КПП) сырых окатышей и покажем ее возможности. Для оценки принципиального изменения картины переувлажнения слоя по длине машины при организации предварительного подогрева сравним данные для обычной схемы сушки с реверсом (продув/просос) (см. рис. 1) и при наличии КПП длиной 2 м, работающей на просос и установленной перед зоной сушки с продувом теплоносителя (рис. 4 и 5).

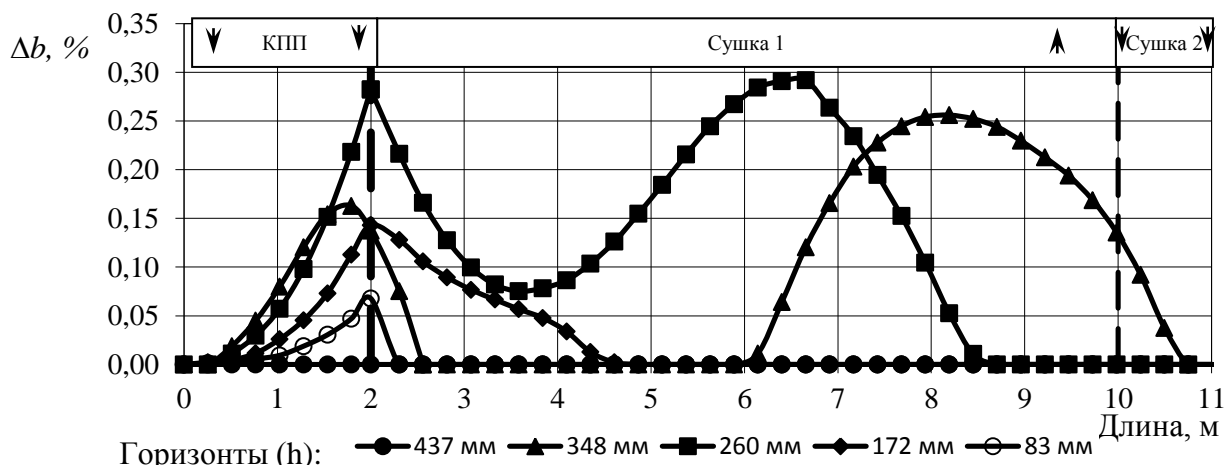


Рис. 4. Величина переувлажнения на различных горизонтах слоя по длине машины при наличии камеры предварительного подогрева

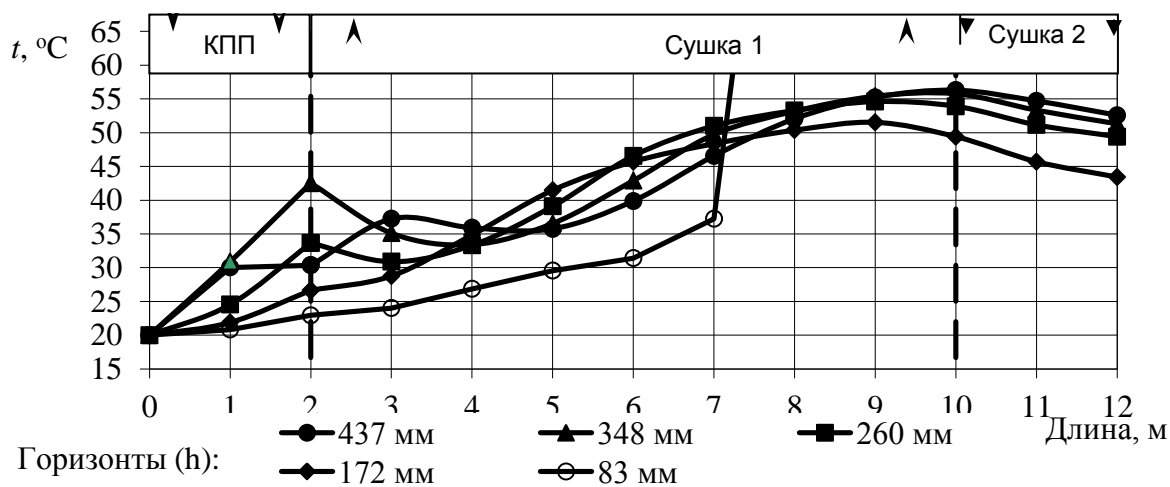


Рис. 5. Температура окатышей на различных горизонтах слоя по длине машины при наличии камеры предварительного подогрева

Расчеты проведены при следующих параметрах: скорость ленты $U = 2,9$ м/мин; высота слоя $H_c = 360$ мм; высота постели $H_{ном} = 80$ мм; начальная влажность окатышей $b_o = 9,6 \%$; $\Delta b_{пред} = 0,55 \%$. Параметры теплоносителя приведены на рис. 4.

Сравнивая данные об изменении величины переувлажнения на различных горизонтах слоя для этих схем (рис. 1 и 4), можно отметить, что в первом случае предельное переувлажнение достигается и длительно (несколько метров – порядка 1 мин) существует на верхнем участке слоя толщиной более 100 мм.

При организации предварительного подогрева максимальное переувлажнение примерно в 2 раза меньше предельного значения и появляется кратковременно только на средних

горизонтах слоя. При этом характеристики переувлажнения для этих двух схем сушки составляют: $F_{\Sigma} = 209 \times 10^{-3}$ и 74×10^{-3} , $g_{св} = 2,1$ и 0 % соответственно, а эффективность сушки немного увеличивается (возрастает с 27 до 30 %).

Из данных рис. 5 следует, что при наличии КПП к моменту начала продува слой уже подогрет по всей высоте в среднем до 33°C , причем нагрев идет не только газом, но и за счет конденсации. В меньшей степени прогрет верх слоя, где идет испарение, и низ, куда еще не дошел фронт конденсации (см. рис. 4). Следует отметить, что скорость нагрева середины слоя в этом случае в два раза больше, чем при продуве теплоносителя. Под поверхностью же слоя (на глубине 90 мм) температура окатышей достигает 42°C , а в середине слоя – 34°C . Именно поэтому далее при продуве в зоне сушке 1 на этих горизонтах переувлажнение развивается значительно слабее (рис. 4), чем в случае отсутствия камеры предварительного подогрева, а на верхних горизонтах даже не начинается.

Для того чтобы получить максимальный эффект от камеры предварительного подогрева необходимо прежде всего найти четкий критерий ее работы. Анализ показал, что эффективность работы КПП по снижению переувлажнения в следующей зоне сушки зависит от скорости фильтрации W , температуры теплоносителя T на этом участке и его длины l , т. е. по существу от количества теплоты, введенной в слой на единицу массы окатышей ($Q_{кпп}$). Оказалось, что оптимальная величина $Q_{кпп}$ может быть одинаковой при различных значениях величин частных параметров, определяющих ее:

$$Q_{кпп} = \frac{60c_2 W T l}{\rho_{нас}^{вл} U_l H_c} \quad (1)$$

Определяющая роль величины $Q_{кпп}$ иллюстрируется табл. 1.

Таблица 1

Расчетная эффективность камеры предварительного подогрева (КПП)

Условия работы С1	Условия работы КПП				Характеристики переувлажнения слоя			Примечания
	l	T	W	$Q_{кпп}$	$F_{\Sigma} \cdot 10^3$	$g_{св}^{C-1}$	$g_{св}^{КПП}$	
	м	°С	м/с	кДж/кг	%*М*МИН	%	%	
$H_{сл} = 360$ мм	Без КПП				209	2,11	–	Для условий Михайловского ГОКа
$W = 1,25$ м/с					74	0	0	
$T = 315^{\circ}\text{C}$	2	200	1	9,2	114	0	0,04	
$U = 2,9$ м/мин	4	100	1					
$H_{сл} = 400$ мм	Без КПП				411	2,96	–	Для условий ОЭМК
$W = 1,15$ м/с					202	0	0,01	
$T = 240^{\circ}\text{C}$	2	100	2	9,2	343	0	0,01	
$U = 1,9$ м/мин	4	100	1					

Необходимо заметить, что интенсифицировать работу КПП целесообразно только до определенного предела, после которого значительное переувлажнение нижней части слоя может развиваться в самой камере подогрева. Для иллюстрации этого положения на рис. 6, а приведены расчетные данные о взаимосвязи средней температуры слоя в конце КПП и удельной теплоты, введенной в камеру прогрева, представляющей собой практически пря-

мую линию. А на рис. 6, б показано, как нарастает переувлажнение слоя в КПП при увеличении его прогрева и как уменьшается при этом переувлажнение в зоне сушки продувом теплоносителя.

Очевидно, что оптимальное значение средней температуры слоя в конце КПП находится в области 25 °С, когда при прососе теплоносителя в КПП переувлажнение еще не достигает предельного значения и нет свободной влаги, а в зоне сушки продувом теплоносителя вынос конденсата на поверхность слоя почти прекращается. Этой температуре слоя соответствует значение $Q_{кпп} = 16$ кДж/кг (рис. 6, а), которое является оптимальным для данных условий.

Оптимальное количество теплоты, которое необходимо ввести в зону предварительного подогрева $Q_{кпп}$, зависит от основных параметров материала и теплоносителя. Некоторые из них неконтролируемо изменяются в процессе эксплуатации, некоторыми можно при необходимости управлять в определенных пределах. Как отмечалось выше, увеличение высоты слоя окатышей приводит к значительному усилению процесса переувлажнения. Так же действует и увеличение влагосодержания теплоносителя, а повышение начальной температуры сырых окатышей способствует резкому снижению образования конденсата в слое.

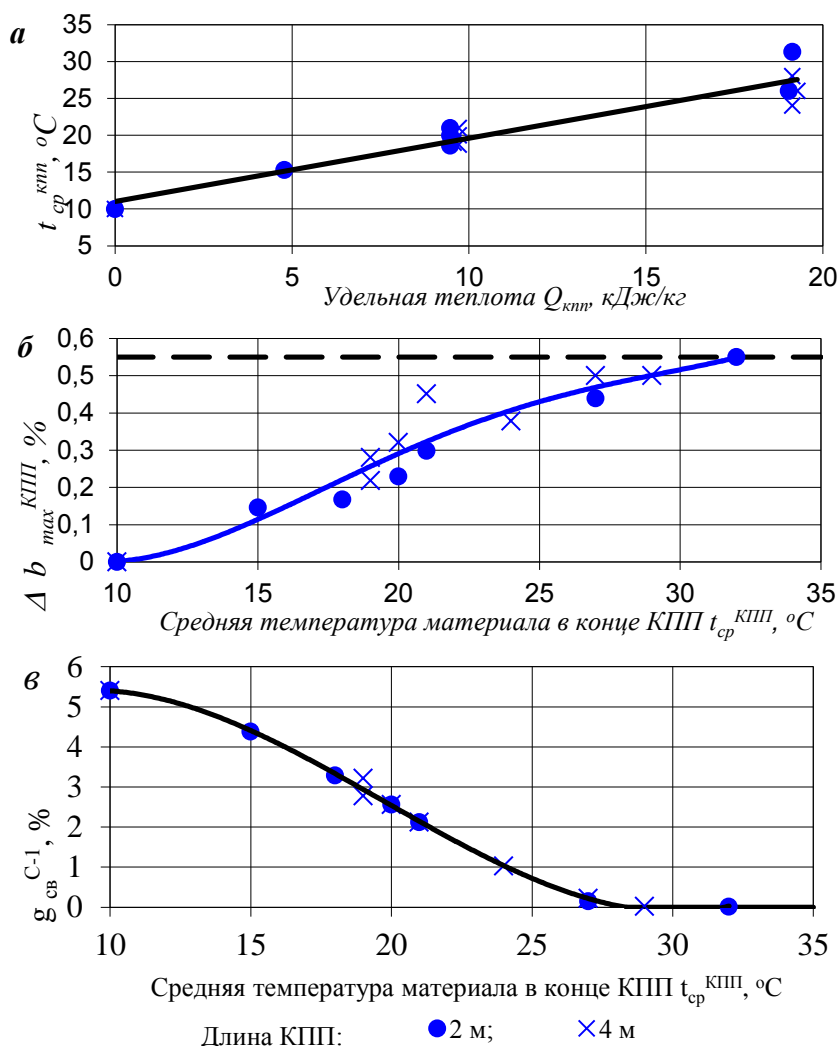


Рис. 6. Связь средней температуры материала в конце КПП с введенным в слой количеством тепла и с характеристиками переувлажнения

Специальными модельными расчетами были определены зависимости оптимального значения $Q_{кпп}$ от всех этих параметров, которые и послужили основой для патента [5]. Для примера в табл. 2 приведены результаты определения оптимальных значений параметров КПП при различной начальной температуре окатышей.

Тепловая нагрузка на камеру предварительного подогрева ($Q_{кпп}$) является управляемым параметром. Так, при модернизации тепловой схемы обжиговой машины с учетом выявленных закономерностей (в зависимости от проектируемой производительности, высоты слоя, температуры исходных окатышей) необходимо определять оптимальную длину камеры, температуру и количество, то есть источник требуемого теплоносителя. На действующей машине при возможных сезонных колебаниях, когда температура исходных окатышей изменяется в диапазоне 10–20 °С, следует оперативно управлять работой камеры предварительного подогрева, изменяя величину $Q_{кпп}$. Наиболее реально регулировать тепловую нагрузку изменением температуры теплоносителя.

Таблица 2

Оптимальная область значений параметров КПП в зависимости от начальной температуры сырых окатышей

t_0	W	T	l	$Q_{кпп}^{opt}$	$t_{кпп}^{cp}$	Δt	Примечания
°С	м/с	°С	м	кДж/кг	°С	°С	
10	0,7–0,8	80–120	4	16,9	23,3	13,3	$T > 120^\circ\text{C}$ недопустима $l = 2$ м недостаточна
20	0,5–0,75	100–200	2–4	13,8	31,4	11,4	$T > 200^\circ\text{C}$ снижает эффективность КПП
30	0,5–1,0	100–220	2–4	9,7	37,6	7,6	$Q_{кпп} > 10$ кДж/кг при $T = 200^\circ\text{C}$ приводит к переувлажнению низа слоя

Рассмотренный способ уменьшения переувлажнения является наиболее эффективным, хотя и требует некоторых конструктивных доработок и приводит к некоторому усложнению тепловой схемы сушки с двумя реверсами теплоносителя. При этом эффективность зоны сушки в целом остается практически неизменной, но появляется возможность увеличить высоту слоя и получить значительную дополнительную прибыль за счет роста производительности и снабжения расходы топлива.

Список использованных источников

1. Боковиков Б. А., Клейн В. И., Малкин В. М. и др. Механизмы образования области переувлажнения окатышей в зоне сушки обжиговой конвейерной машины // Сталь. 2003. № 9. С. 20–23.
2. А.с. 580238 СССР. Способ сушки окатышей на обжиговой конвейерных машинах / Я. Л. Белоцерковский, Н. Н. Бережной, А. П. Буткарев и др. // Открытия, изобретения. 09.11.1977.
3. Солодухин А. А. Закономерности формирования зоны переувлажнения окатышей на обжиговой конвейерной машине. Кандидатская диссертация. Екатеринбург, 2012.

4. Боковиков Б. А., Борисенко Б. И., Солодухин А. А. и др. Анализ возможных путей совершенствования работы зоны сушки окатышей на конвейерных машинах // Сталь. 2003. № 9. С. 17–20.

5. Пат. РФ № 2353675. Способ сушки окатышей в слое с предварительным подогревом / Б. А. Боковиков, А. А. Солодухин, С. Н. Евстюгин, В. И. Клейн. Бюллетень № 12, 27.04.2009.

УДК 669.045

**В. И. Большаков¹, А. В. Бородулин¹, В. С. Листопадов², А. Л. Чайка¹,
А. А. Сохацкий¹, А. И. Швачка¹**

¹ Институт черной металлургии НАН Украины, г. Днепропетровск, Украина

² ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог», г. Кривой Рог, Украина

КОНТРОЛЬ СУММАРНОЙ ВЕЛИЧИНЫ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ С ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДОЙ НА ПЕЧАХ ДОМЕННОГО ЦЕХА И ИХ ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ

Аннотация

Выполнены исследования тепловой работы доменных печей различного объема и проведены замеры их внешних тепловых потерь. По результатам выполненных исследований на доменной печи №9 ПАО «АМКР» реализована система автоматизированного контроля суммарных внешних тепловых потерь в системе охлаждения и расхода кокса на их покрытие, формирующая предупреждающий сигнал об изменениях в тепловой и газодинамической работе печи. Показана нестабильность потерь теплоты во времени и необходимость их автоматизированного контроля. Реализация автоматизированной системы контроля внешних тепловых потерь и расхода кокса на их покрытие на доменной печи позволит увеличить эффективность оперативного управления ее тепловым режимом работы, стабильность качества выплавляемого чугуна, ресурс работы футеровки и холодильников доменной печи за счет своевременного обнаружения и оценки причин отклонений в тепловом и газодинамическом режиме работы печи.

Ключевые слова: доменная печь, цех, система охлаждения, тепловые потери, расход кокса на покрытие тепловых потерь, автоматизированный контроль.

Abstract

The studies of heat of blast furnaces of various sizes and conducted measurements of their external heat losses. The results of the studies on the blast furnace number 9 PJSC "AMKR" implemented the automated control system of total external heat losses in the cooling system and the consumption of coke on their cover, forming a warning signal of changes in the thermal and gas-dynamic operation of the furnace. Shows the instability of heat losses in time and the need for automated control. Implementation of an automated control system of external heat losses and consumption of coke on their coating on blast furnace will increase the efficiency of the operational management of its thermal mode of operation, quality stability of smelted iron, a resource which the

© Большаков В. И., Бородулин А. В., Листопадов В. С., Чайка А. Л., Сохацкий А. А., Швачка А. И., 2014